

同時発表：

筑波研究学園都市記者会（資料配布）

文部科学記者会（資料配布）

科学記者会（資料配布）



鉄系超伝導体に添加した亜鉛元素が超伝導対を破壊することを確認

～鉄系超伝導のメカニズム解明の大きな一歩～

配布日時：平成27年7月9日14時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）超伝導物性ユニットの李 軍（元NIMSジュニア研究員）、王 華兵（主幹研究員）、山浦一成（主席研究員）とルーヴェン・カトリック大学（ベルギー）の研究者らからなる研究チームは、鉄系超伝導体に添加した微量（3%）の亜鉛元素が超伝導対¹⁾を破壊することを確認しました。この成果は、鉄系超伝導体のメカニズムの解明にむけた大きな一歩であり、高性能な超伝導材料の開発への貢献が期待されます。
2. 鉄系超伝導体に関する研究は世界的に推進されていますが、超伝導状態が発現するメカニズムについて十分なレベルで解明されていないのが現状です。特に、微量（数%）の不純物によって超伝導がどのように変化するか（不純物効果²⁾）を正確に観測することは、超伝導発現機構の解明に向けて重要だと考えられています。鉄系超伝導体の結晶に亜鉛を微量（数%）添加すると、その添加量に依存して超伝導転移温度が低下することが、これまでの研究で明らかになっていました。しかし、その転移温度の低下が理論的に予見される超伝導対の破壊によるものか、あるいは、結晶の乱れの程度が増加したことによる、何らかの影響によるものかが明確ではありませんでした。
3. 本研究チームは、亜鉛を3%含有する鉄系超伝導体の結晶に微細加工を施して100ナノメートル四方程度の断面を持つ極めて微小な棒状結晶を作成しました。この棒状結晶を冷却して、電圧-電流特性を調べたところ、規則的なステップを伴う超伝導転移を観測しました。一方、亜鉛を添加しなかった場合には、超伝導の通常的一段転移を観測しました。すなわち、亜鉛を添加した結晶では超伝導の領域が大幅に狭まっていることが示唆されました。全ての実験結果を解析・考察した結果、結晶中の亜鉛元素を中心とする局所的な非超伝導領域が生まれ、それが点在するため、実質的な超伝導領域が空間的に大幅に狭まり、超伝導の量子的な特徴が顕在化したと考えられます。つまり、結晶に添加した亜鉛元素が超伝導対を破壊する様子を間接的に観測したことになります。
4. 鉄系超伝導体の転移温度が、数%程度の亜鉛の添加量に依存して低下したこれまでの観測結果は、何らかの結晶の乱れの影響などではなく、亜鉛元素が直接的に超伝導対を破壊したことが支配的な要因だと思われます。少なくとも、亜鉛元素が局所的に超伝導対を破壊することが確かめられました。この実験結果は、鉄系超伝導体の発現機構解明に向けた着実な一歩であり、高性能な超伝導材料の開発、社会的要請が高い超伝導基盤技術の確立に貢献します。
5. 本研究は、主に最先端研究開発支援（FIRST）プログラム（中心研究者：細野秀雄）のサブテーマ“超高压合成を活用した新規超電導体の探索（室町英治）”（平成26年3月31日終了）とNIMS第3期中期計画プロジェクト“先端超伝導材料に関する研究（宇治進也）”のもとで実施されました。本研究成果は、オンライン誌“ネイチャーコミュニケーションズ（Nature Communications）”にて2015年7月3日に掲載されました。

研究の背景

2008年に東工大の細野秀雄教授らによって発見された鉄系超伝導体は、銅系超伝導体に次ぐ高い転移温度を持つ新高温超伝導体です。高性能な超伝導材料の開発シーズとして期待されており、材料化に向けた研究が進展していますが、超伝導がどのように発現しているか、その機構の解明が不十分なことが問題でした。超伝導の発現機構の解明には、微量（数%）の不純物によって超伝導がどのように変化するか、不純物効果を測定することが重要だと言われています。しかし、不純物効果の実験の困難さから理論モデルの検証が十分に進んでいませんでした。

亜鉛は超伝導対を破壊する効果が高い元素として期待されたため、亜鉛を不純物として添加する研究が行われましたが、亜鉛を微量（数%）含有する鉄系超伝導体の結晶育成が通常の方法では困難でした。本研究チームは、これまでの研究で、NIMSの高圧技術を利用して亜鉛を数%添加した結晶の育成に成功し、亜鉛の添加量に依存して超伝導転移温度が低下することを明らかにしました。しかし、転移温度の低下が亜鉛元素による超伝導対の破壊によるものか、あるいは添加による結晶の乱雑さの程度が高まったことに関係する何らかの影響によるものかが明確ではありませんでした。鉄系超伝導体の不純物効果の研究を深めるためには、亜鉛による超伝導対の破壊の有無を検証する必要性がありました。

研究内容と成果

今回、研究チームは、3%の亜鉛を添加した鉄系超伝導体の結晶（化学組成： $\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{Fe}_{1.94}\text{Zn}_{0.06}\text{As}_2$ ）をナノスケールで微細加工して、100ナノメートル四方程度の断面を持つ棒状結晶を作成しました（図1 a、1 b参照）。また断面のサイズを変更した棒状結晶や亜鉛を含まない棒状結晶を比較のために作成しました。

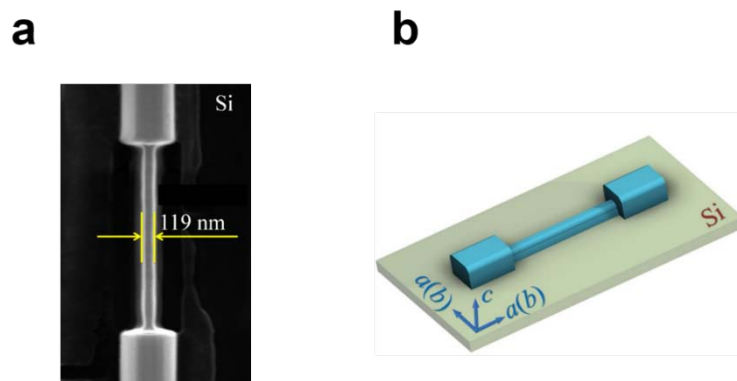


図1 (a) 微細加工された鉄系超伝導結晶（亜鉛を3%添加）の電子顕微鏡写真と、(b) その模式図。基盤は非電気伝導体である珪素の結晶。文字は超伝導結晶の結晶軸の方位を示す。鉄ヒ素からなる超伝導層は基盤と水平になるように位置している。

この棒状結晶を冷却して電圧－電流特性を測定した結果、図2 aに示すような規則的なステップを伴う超伝導転移を観測しました。この結果は、超伝導の量子的な揺ぎが顕在化していることを示唆しています。比較のために、亜鉛を含まない棒状結晶でも同様な測定を行いました。超伝導の通常の一段転移を観測しました。おそらく亜鉛元素が局所的に超伝導を妨げ、実質的な超伝導領域が、量子性が顕在化するまで空間的に狭まったからだと考えられます。全ての結果を総合的に検討すると、亜鉛元素が局所的に超伝導対を破壊することが間接的に示されました。

図2 bに、このような超伝導領域が空間的に狭くなった状態の模式図を示しています。図中の楕円程度の大きさに局所的な非超伝導領域が生じたと考えられ、この非超伝導領域が結晶全体に点在したため、実効的な超伝導領域が大幅に狭まったと考えられます。このように、超伝導対の破壊によって空間的に狭まった超伝導の様子は、銅系超伝導体の研究でも観測され、穴あきチーズの様相に似ていることからスイスチーズモデルとも呼ばれています。

今回の実験結果として、結晶中の微量の亜鉛によって超伝導対が破壊されることが確認されました。この結果と、これまでに提案された超伝導発現機構の理論モデルとの整合性については、さらに検証が必要です。

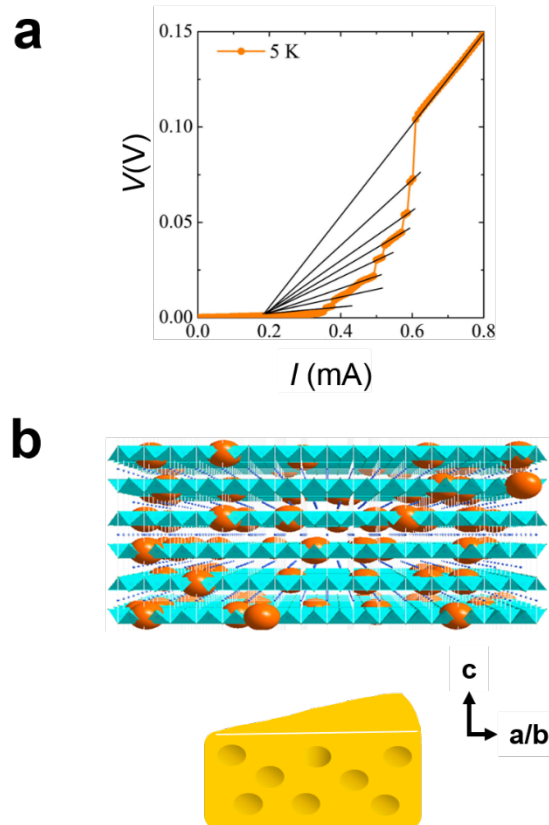


図2 (a) 絶対温度³⁾ 5 K (ケルビン) で測定した微細加工された鉄系超伝導体結晶 (亜鉛を 3% 添加) の電圧 (V) - 電流 (I) 特性。図中の実線はデータ解析用の補助線。一点に向かって収束する様子は、超伝導の量子揺ぎが顕在化していることを示唆する。(b) 結晶構造の模式図。層になっている部分が鉄ヒ素層に相当する。結晶軸の c 軸方向に積み重なっている。添加した亜鉛は楕円球状の局所的な領域で超伝導対を破壊するため、超伝導領域が狭まり、メゾスコピック⁴⁾ な超伝導状態が出現したと考えられる。このメゾスコピックな様相はスイスチーズ (下図) に例えられる。

今後の展開

本成果は鉄系超伝導体の発現機構の解明に向けた着実な一歩であり、高性能な超伝導材料開発や社会的要請が高い超伝導基盤技術の確立に貢献します。

掲載論文

題目 : Local destruction of superconductivity by non-magnetic impurities in mesoscopic iron-based superconductors

著者 : Jun Li, Min Ji, Tobias Schwarz, Xiaoxing Ke, Gustaaf Van Tendeloo, Jie Yuan, Paulo J. Pereira, Ya Huang, Gufei Zhang, Hai-Luke Feng, Ya-Hua Yuan, Takeshi Hatano, Reinhold Kleiner, Dieter Koelle, Liviu F. Chibotaru, Kazunari Yamaura, Hua-Bing Wang, Pei-Heng Wu, Eiji Takayama-Muromachi, Johan Vanacken & Victor V. Moshchalkov

雑誌 : NATURE COMMUNICATIONS

掲載日時 : 2015 年 7 月 3 日

用語解説

(1) 超伝導対

超伝導電流の最小単位は対を組んだ2個での電子であるため、超伝導対と称する。BCS理論の研究者の名前をとって、クーパー対と呼ぶこともある。2個の電子がペアを組むメカニズムは、すなわち超伝導発現機構であり、鉄系超伝導体に関しては、様々な可能性が検討されている。

(2) 不純物効果

超伝導などの電子状態を調べる手法としてよく利用される。磁性元素、または非磁性元素など何らかの不純物を超伝導物質に微量添加して、超伝導特性がどのように変化するかを観測する。不純物効果は超伝導発現機構に強く依存するため、機構解明に有益な情報を得られる場合が多い。

(3) 絶対温度

極低温の事象を検証する際によく利用される温度単位（単位はK、ケルビン）。学術的には熱力学温度とも呼ばれる。絶対温度 5ケルビンをセルシウス温度（単位は℃）に換算すると、マイナス 268.15℃になる。

(4) メゾスコピック

マクロ（人間の生活スケール）とマイクロ（原子スケール）の中間領域的、という意味合いで使用される。ナノテクノロジーの領域（1ナノメートル～数百ナノメートル）と重なる場合が多い。特に、固体中の電子の量子性が顕在化するようなスケールを指す場合が多い。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構超伝導物性ユニット

主席研究員 山浦 一成（やまうら かずなり）

TEL: 029-860-4658

E-mail: yamaura.kazunari@nims.go.jp

URL: http://samurai.nims.go.jp/YAMAURA_Kazunari-j.html

（報道・広報に関すること）

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp